

## PRODUKSI ARUS ION DARI HEAD SUMBER ION EKSPERIMEN UNTUK SIKLOTRON 13 MeV

Silakhuddin

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN  
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281  
e-mail : [ptapb@batan.go.id](mailto:ptapb@batan.go.id)

Diterima 20 Januari 2011, diterima dalam bentuk perbaikan 04 Januari 2012, disetujui 19 April 2012

### ABSTRAK

**PRODUKSI ARUS ION DARI HEAD SUMBER ION EKSPERIMEN UNTUK SIKLOTRON 13 MeV.** Untuk membuat desain detil sumber ion yang dapat dibuktikan unjuk kerjanya, telah dilakukan pembuatan head sumber ion eksperimen. Diawali dengan pembuatan model head dengan anoda berongga lurus kemudian dihitung produksi ion  $H^-$  maksimum. Selanjutnya dibuat head eksperimen dan diukur kemampuannya dalam menghasilkan arus ion  $H^-$ . Dari hasil perhitungan model tersebut diperoleh arus ion  $H^-$  maksimum sebesar  $26,5 \mu A$  sedangkan hasil eksperimen sebesar  $14 \mu A$ . Perbedaan ini masih dapat diterima dengan mempertimbangkan adanya efisiensi pembentukan plasma dan efisiensi ekstraksi yang tidak sempurna.

**Kata kunci:** sumber ion, head eksperimen, siklotron

### ABSTRACT

**ION CURRENT PRODUCTION OF EXPERIMENTAL ION SOURCE HEAD FOR 13 MeV CYCLOTRON.** To create a detailed design of ion sources that its performance can be proven, it has been made an experimental head of the ion source. Beginning with the creation a head model with anode of straight hollow and then the maximum  $H^-$  ion production was calculated. Subsequently making head of experiments and measured its ability to produce  $H^-$  ion current. From calculation of the model the maximum  $H^-$  ion currents was  $26.5 \mu A$  while the experimental results was  $14 \mu A$ . This difference is still acceptable to consider the plasma generating and the extraction efficiency are not perfect.

**Keywords:** ion source, experimental head, cyclotron

### PENDAHULUAN

Kemampuan teknologi rancang bangun komponen siklotron akan berdampak pada kemampuan keahlian lokal dalam perbaikan yang serius pada komponen-komponen siklotron khususnya yang digunakan untuk fasilitas PET, sehingga ketergantungan terhadap pihak luar negeri akan dapat dikurangi. Pada tahun 2010 telah dilaksanakan suatu kegiatan litbang rancang bangun prototipe sumber ion yang merupakan bagian dari program besar desain siklotron 13 MeV untuk fasilitas PET. Melalui program insentif peningkatan kemampuan peneliti dan perekayasa Kemenristek telah dijalankan program rancang bangun sumber ion tersebut. Pada tahun 2010, kegiatan rancang bangun ini terdiri atas: perhitungan-perhitungan desain, pembuatan gambar keteknikan (*engineering drawing*), rancang bangun komponen *head* beserta pengujiannya dan pembuatan sumber daya katoda 2kV 2A. Pada tahun 2011 hingga tahun 2013 akan dilanjutkan dengan pembuatan-pembuatan komponen *holder*, sistem penggerak, sistem pendingin, sistem pengujian dan pengujian seluruh sistem sumber ion.

Komponen *head* sumber ion adalah bagian yang paling krusial dari keseluruhan komponen yang akan di rancang bangun, karena di bagian inilah berkas ion dibentuk. Tanpa komponen yang lain masih dapat disebut sumber ion tidak lengkap tetapi tanpa komponen *head* berarti bukan sumber ion. Untuk itu desain *head* sumber ion menjadi prioritas pertama dan utama dari seluruh kegiatan rancang bangun.

Sumber ion yang dirancang bangun adalah jenis *PIG (Penning Ionization Gauge)*, sebagaimana pada siklotron yang menggunakan sumber ion internal, dimaksudkan untuk menghasilkan ion-ion  $H^-$ . Untuk produksi radioisotop PET biasanya diperlukan besar arus terekstraksi ke target pada kisaran 30-80  $\mu A$  <sup>(1,2,3)</sup>. Jika diambil harga tengah 50  $\mu A$  dan dengan asumsi efisiensi pemercepatan sebesar 50% <sup>(4)</sup>, arus ion yang harus dihasilkan oleh sumber ion sebesar 100  $\mu A$ .

Dalam makalah ini disajikan tentang hasil-hasil yang telah diperoleh bagian pertama dari langkah-langkah rancang bangun tersebut yaitu perhitungan-perhitungan desain *head* sumber ion yang dibuktikan dengan

eksperimen. Karena litbang ini bukan litbang dasar dan pada dasarnya bersifat *semi reversed engineering* maka tidak semua komponen dari *head* dilakukan perhitungan. Komponen-komponen yang geometrinya sudah cukup dikenal luas tidak dilakukan perhitungan desainnya. Dalam desain ini dilakukan perhitungan kemampuan *head* dalam menghasilkan arus ion dan kemudian divalidasi dengan hasil eksperimen.

## METODOLOGI

### Perhitungan Besar Arus Ion Maksimum

Dalam sumber ion PIG (*Penning Ionization Gauge*) di mana ionisasi terbentuk karena tumbukan elektron, jumlah atom atau molekul yang diionisasi tergantung pada parameter-parameter<sup>(5)</sup>:

1. Rapat arus elektron (ampere per m<sup>2</sup>),  $J_e$
2. Volume efektif ionisasi,  $V$ .
3. Jumlah atom/molekul per satuan volume ruang ionisasi,  $n_a$
4. Tampang lintang ionisasi,  $\sigma_i$

Laju pembentukan ion dalam ruang ionisasi:

$$I_i = J_e V n_a \sigma_i \quad (1)$$

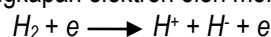
Untuk sumber ion PIG,  $J_e$  dapat diambil dari rapat arus lucutan elektron antara katoda dan anoda.

$V$  adalah bagian volume di mana atom-atom gas terionisasi, yang tidak harus sama dengan volume ruang ionisasi. Nilai  $n_a$  dapat dihitung dari persamaan:

$$n_a = \frac{p}{kT} \quad (2)$$

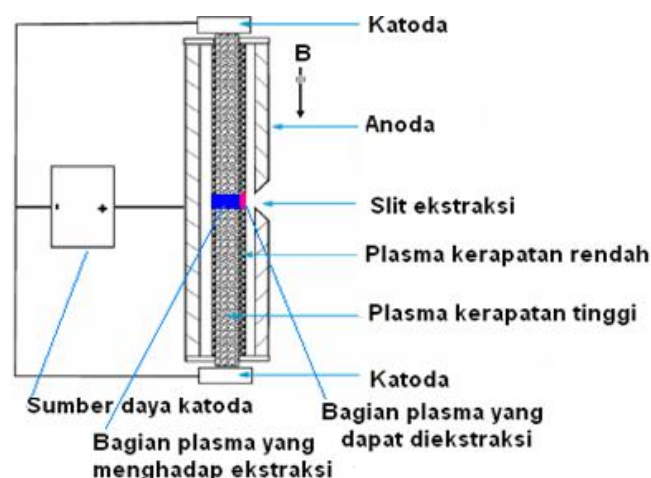
di mana  $p$  adalah tekanan gas,  $k$  tetapan Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K dan  $T$  suhu plasma dalam °K.

Pembentukan ion H<sup>+</sup> terjadi karena tangkapan elektron oleh molekul H<sub>2</sub> melalui reaksi disosiasi:

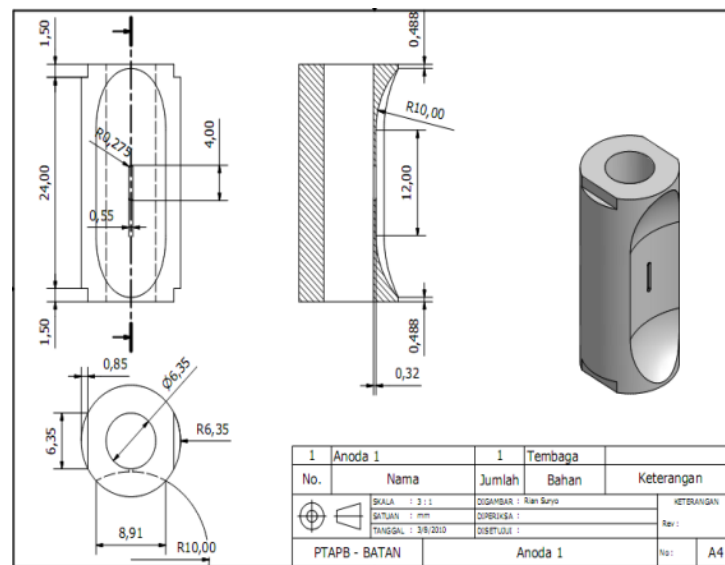


Puncakampang lintang reaksi terjadi pada energi elektron 17,2 eV sebesar  $3,5 \cdot 10^{-24}$  m<sup>2</sup>(6). Rumus yang digunakan seperti pada persamaan 1 dan 2. Dalam persamaan-persamaan tersebut terdapat parameter-parameter yang harus ditentukan yaitu:

1. Rapat arus elektron  $J_e$   
Parameter ini sama dengan arus lucutan dari katoda dibagi dengan luasan efektif  $A$  dari plasma. Luasan efektif plasma ditetapkan seperti gambar geometri desain anoda dari *head* seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.
2. Volume efektif,  $V$   
Luasan efektif dari plasma sama dengan luasan efektif plasma di dalam ruang anoda dikalikan tinggi anoda.
3. Jumlah atom/molekul persatuan volume,  $n_a$ ,  
Nilainya dihitung persamaan (2).
4. Tampang lintang ionisasi,  $\sigma_i$ ,  
Tampang lintang ionisasi diambil dari acuan 6.



Gambar 1. Skema sistem sumber ion tipe PIG

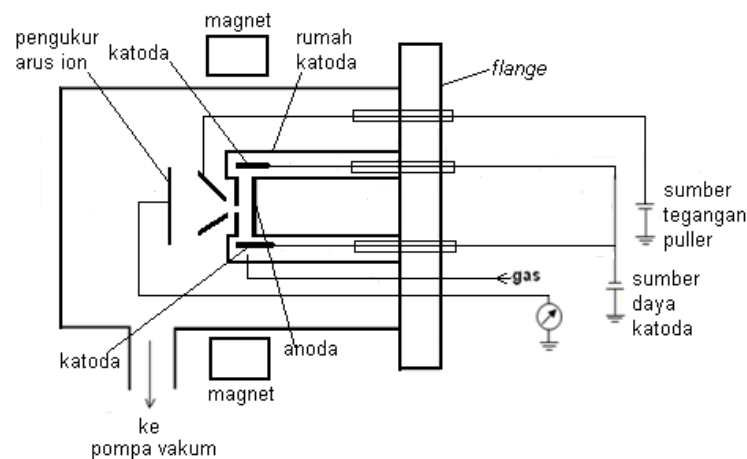


Gambar 2. Gambar teknik dari anoda

5. Jumlah tumbukan per elektron,  
 Jumlah tumbukan dihitung dari energi elektron sewaktu lepas dari katoda (muatan kali beda tegangan anoda-katoda). Dalam perhitungan ini diambil asumsi-asumsi
  - Medan magnet siklotron cukup kuat sehingga sebelum terjadi ionisasi pada molekul-molekul gas, tidak ada elektron yang melucut dari katoda akan mengenai dinding anoda.
  - Netralisasi ion-ion pada baikyang terjadi di dalam plasma maupun pada dinding anoda diabaikan.

### Perangkat Eksperimen

Diagram perangkat eksperimen *head* sumber ion dalam menghasilkan arus ion ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Perangkat eksperimen pengujian *head* sumber ion

Komponen-komponen eksperimen terdiri atas:

1. Komponen *head*:
  - Anoda dari bahan alloy W-Cu dalam komposisi 70%/30% buatan Goodfellow Inc
  - Katoda dari bahan tantalum
  - Rumah katoda dari bahan tembaga biasa
2. *Puller* terbuat dari bahan grafit
3. Penangkap arus dari bahan aluminium
4. Magnet permanen, 200 gauss di tengah *head*

Komponen-komponen 1 sampai 3 berada dalam ruang vakum. *Head* tidak menggunakan aliran air pendingin karena eksperimen dilakukan dengan daya rendah.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Perhitungan

Untuk menghitung arus ion negatif dilakukan dengan melihat proses-proses sebagai berikut:

#### 1. Ionisasi oleh elektron dari katoda

Untuk menghitung arus ionisasi total dari katoda berdasarkan persamaan 1, dihitung terlebih dahulu parameter-parameter operasi sebagai berikut:

##### a. Rapat arus elektron, $J_e$

Jika arus lucutan elektron  $I_e$  dan luasan efektif plasma adalah  $A$ , maka

$$J_e = \frac{I_e}{A} \quad (3)$$

Luasan efektif plasma dianggap sama dengan luasan katoda yang menghadap ke rongga anoda. Karena seluruh luasan penampang rongga anoda tertutup dengan permukaan katoda, maka luasan penampang rongga tersebut dapat dianggap sebagai luas efektif plasma,  $A$ , yang besarnya:

$$A = \pi \times \left(\frac{1}{2} \times 6,35\right)^2 \text{ mm}^2 = 31,7 \text{ mm}^2 = 0,317 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Sehingga  $J_e = \frac{I_e}{0,317 \times 10^{-4}} \text{ ampere/m}^2 = 1,15 \times 10^4 \times I_e \text{ ampere/m}^2$

##### b. Volume efektif plasma, $V$

$$V = A \times \text{tinggi anoda} = 0,317 \times 10^{-4} \times 27 \times 10^{-3} \cong 8,6 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

##### c. Jumlah atom/molekul per satuan volume

Tekanan dalam ruang plasma dalam eksperimen ini tidak dilakukan karena kesulitan teknis, maka diambil berdasarkan teori yaitu  $p \cong 10^{-1} \text{ mb} = 10^{-4} \text{ bar} = 10 \text{ N/m}^2$ .

Suhu plasma diambil nilai  $T \approx 10^3 \text{ K}$  didasarkan bahwa pada kondisi ini adalah suhu yang hampir maksimum dari plasma di mana komponen-komponen *head* sumber ion dari bahan tembaga tidak meleleh, yang mana titik leleh tembaga adalah  $1356,15 \text{ K}$  <sup>(7)</sup>.

Maka berdasar persamaan 2,  $n_a = \frac{10}{1,38 \times 10^{-23} \times 10^3} = 0,725 \times 10^{22} \text{ molekul/m}^3$ .

##### d. Tampang lintang ionisasi, $\sigma_i$

Tampang lintang reaksi maksimum pembentukan ion H<sup>-</sup> berdasarkan acuan 6 adalah sebesar  $3,5 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$  yang terjadi pada energi 17,2 eV.

##### e. Jumlah tumbukan per elektron

Energi elektron awal adalah  $V \text{ eV}$ , bila energi ionisasi atom hidrogen 17,2 eV maka setiap elektron melakukan ionisasi sebanyak  $\sim \frac{V}{17,2}$  kali.

Berdasarkan persamaan (1) dan dengan parameter-parameter perhitungan di atas maka besarnya laju produksi ion negatif maksimum dari hidrogen diseluruh ruang ionisasi (setelah dikalikan faktor  $\frac{V}{17,2}$  kali dan dengan mengabaikan adanya rekombinasi dan netralisasi) :

$$\begin{aligned} I_i^- &= \frac{V}{17,2} \times 1,15 \cdot 10^4 \times I_e \times 8,6 \cdot 10^{-7} \times 0,725 \cdot 10^{22} \times 3,5 \cdot 10^{-24} \\ &= 1,46 \cdot 10^{-5} \times V \times I_e \text{ ampere} \end{aligned}$$

di mana  $V$  dalam volt dan  $I_e$  dalam ampere.

#### Laju pembentukan ion di daerah ekstraksi

Besarnya arus ion negatif yang dapat diekstraksi dari sumber ion adalah sama dengan laju pembentukan ion negatif di daerah volume yang menghadap ke penampang ekstraksi. Luas penampang ekstraksi (lihat Gambar 2):  $0,55 \times 4 \text{ mm}^2 = 2,2 \text{ mm}^2$ . Ketebalan bagian plasma diambil sama dengan diameter rongga anoda : 6,35 mm. Maka volume plasma yang menghadap lubang ekstraksi (lihat Gambar 1) adalah:  $2,2 \times 6,35 \text{ mm}^3 = 13,97 \text{ mm}^3 = 13,97 \times 10^{-9} \text{ m}^3$ .

Arus pembentukan ion negatif di daerah ekstraksi :

$$I_{ext}^{-} = \frac{\text{Volume plasma yang menghadap ke lobang ekstraksi}}{\text{Volum efektif ionisasi (V)}} \times I_i^{-}$$

$$I_{ext}^{-} = \frac{13,97 \times 10^{-9}}{8,6 \times 10^{-7}} \times 1,46 \cdot 10^{-5} \times V \times I_e \text{ ampere } 2,37 \cdot 10^{-7} \times V \times I_e \text{ ampere}$$

Dalam eksperimen yang dilakukan, besarnya tegangan katoda (terhadap anoda) adalah sebesar  $V = 3200$  volt. Sebelum gas masuk tidak ada arus katoda yang terukur pada keluaran sumber daya katoda (lihat Gambar 3) sehingga arus katoda setelah gas masuk dapat dianggap sama dengan arus lucutan elektron melalui gas  $I_e = 35$  mA =  $3,5 \times 10^{-2}$  A. Arus maksimum terekstraksi:

$$I_{ext}^{-} = 2,37 \cdot 10^{-7} \times 3200 \times 3,5 \times 10^{-2} = 26,5 \times 10^{-6} \text{ A} = 26,5 \mu\text{A}$$

### Hasil Eksperimen

Eksperimen dilakukan dengan parameter-parameter operasi:

1. Tegangan katoda,  $V = 3200$  volt, nilai ini adalah tegangan maksimum pada kondisi tidak terjadi *spark* di dalam ruang katoda.
2. Arus katoda,  $I_e = 35$  mA yang dicapai pada tegangan katoda 3200 volt
3. Medan magnet  $B = 200$  gauss
4. Jarak anoda-puller 3 mm

Hasil arus ion  $H^{-}$  sebagai fungsi tegangan puller ditunjukkan pada Tabel 1 dan arus rata-ratanya ditunjukkan pada Gambar 4.

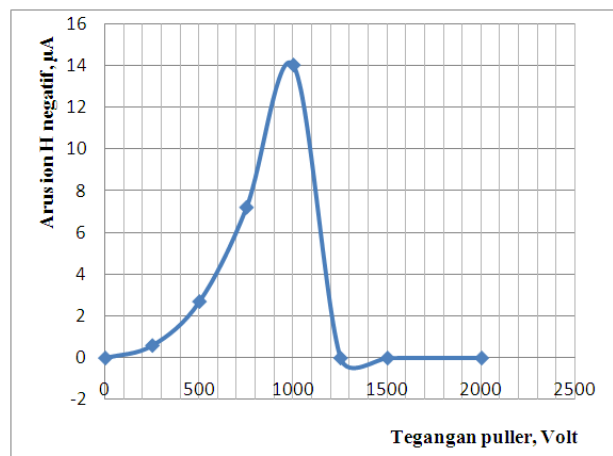
Tabel 1. Arus ion  $H^{-}$  sebagai fungsi tegangan puller

Tegangan puller, volt	Arus ion $H^{-}$ , $\mu\text{A}$									
	Pengukuran ke									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Rata-rata
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	-	0,6
500	2,5	2,5	2	2,5	2,5	3	2,5	4	3	2,7
750	5	5,5	5	5,5	9	8	8,5	8	10	7,2
1000 <sup>(***)</sup>	11 <sup>(**)</sup>	10,5	11	12	10	15	20	20	15	14
1250	-	-	-	-	-	15 <sup>(*)</sup>	20 <sup>(*)</sup>	20 <sup>(*)</sup>	-	
1500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<sup>(\*\*\*)</sup> : pada tegangan 1000 volt, arus katoda 35 mA

<sup>(\*\*)</sup> : teramati selama 15 menit

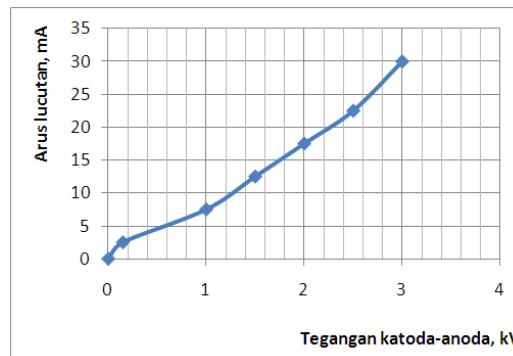
<sup>(\*)</sup> : tidak stabil



Gambar 4. Arus  $H^{-}$  sebagai fungsi tegangan puller

Dari tabel tersebut teramati bahwa arus maksimum terjadi pada tegangan *puller* 1000 volt dengan arus ion rata-rata 14  $\mu\text{A}$ . Di atas tegangan 1000 volt arus menjadi tidak stabil dan selanjutnya hilang, ini disebabkan terjadi *spark* di antara anoda-*puller*. Dibandingkan hasil perhitungan di mana arus ion maksimum adalah sebesar 26,5  $\mu\text{A}$ , maka di antara keduanya terdapat perbedaan yang dapat diterima dikarenakan adanya tiga faktor ketidakpastian. Pertama adalah karena medan magnet yang hanya 200 gauss di rongga anoda menyebabkan tidak seluruh aliran elektron di rongga tersebut berkontribusi dalam pembentukan plasma. Dalam hal ini masih ada elektron yang tidak bergerak osilasi-spiral untuk membangkitkan plasma tetapi “hingga” di dinding anoda. Kedua adalah asumsi dalam perhitungan bahwa seluruh bagian plasma yang menghadap ke lobang ekstraksi dianggap terekstraksi seluruhnya, padahal dalam kenyataannya pengaruh medan listrik dari *puller* tidak dapat menembus hingga bagian tepi belakang dari rongga anoda, sehingga tidak memungkinkan seluruh bagian berkas tersebut terekstraksi keluar dari rongga anoda. Dan ketiga adalah efisiensi ekstraksi berkas ion oleh *puller* yang tidak pasti 100%.

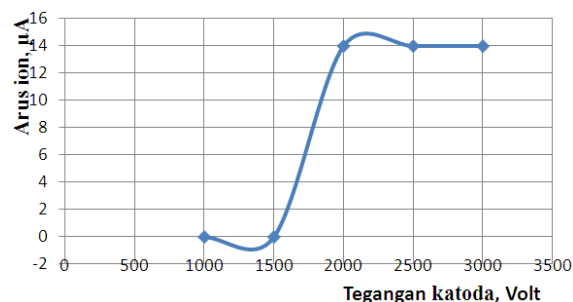
Keperluan atau sasaran dari keluaran arus ion pada rancangbangun sumber ion adalah sebesar minimum 100  $\mu\text{A}$ . Dalam eksperimen ini baru diperoleh arus ion 14  $\mu\text{A}$  dengan operasi daya lucutan sekitar 100 W dan medan magnet 200 gauss. Pada operasi sesungguhnya, siklotron untuk fasilitas PET umumnya digunakan daya lucutan di atas 1 kW dan medan magnet di atas 10.000 gauss<sup>(1,2,8)</sup>. Jadi hasil eksperimen dari desain *head* ini mempunyai potensi untuk menghasilkan arus ion 100  $\mu\text{A}$  jika dioperasikan pada sistem siklotron. Hubungan antara tegangan katoda dengan arus katoda ditunjukkan pada pada Gambar 5.



Gambar 5. Arus lucutan antara katoda dan anoda sebagai fungsi tegangan katoda

Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses lucutan elektron dari katoda masih dalam mode *Penning* dan tidak pada mode *thermionic*, artinya bahwa lucutan tersebut hanya disebabkan adanya tegangan tinggi katoda-anoda sedangkan lucutan oleh tumbukan ion-ion positif belum terjadi secara signifikan. Hal ini terjadi karena arus lucutan yang masih rendah yaitu hanya 35 mA. Karakteristik mode *Penning* beroperasi pada tegangan di atas 1700 V dan arus di bawah 100 mA dan karakteristik mode *thermionic* bekerja pada tegangan ratusan volt dan arus lucutan ratusan mA hingga ampere<sup>(9)</sup>.

Hasil eksperimen lainnya adalah tentang pengaruh tegangan katoda pada arus ion yang dihasilkan. Hasilnya ialah bila tegangan katoda diturunkan dari 3000 volt, arus ion tetap stabil dan mulai tegangan dibawah 2000 volt arus ion langsung menjadi nol, seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Ini menunjukkan bahwa di bawah tegangan katoda 2000 volt tidak terjadi lucutan elektron dari katoda ke anoda, hal ini karena *ignition voltage* dari bahan katoda tantalum adalah 1700 volt<sup>(5)</sup>.



Gambar 6. Arus ion sebagai fungsi tegangan katoda

## KESIMPULAN

*Head* sumber ion eksperimental telah dibuat dan dilakukan pengukuran unjuk kerjanya. Hasil utama yang diperoleh adalah bahwa dengan arus lucutan 35 mA diperoleh arus ion  $H^-$  sebesar 14  $\mu A$ , suatu nilai yang masih dapat diterima dibandingkan dengan perhitungan desain maksimum sebesar 22,5  $\mu A$  yang mempertimbangkan efisiensi pembentukan plasma oleh elektron dan efisiensi ekstraksi oleh *puller* yang tidak sempurna. Jika *head* sumber ion ini dioperasikan dengan parameter-parameter operasi sumber ion dalam suatu siklotron maka dari produksi arus ion ini dapat dikatakan bahwa desain dari *head* ini cukup layak dipakai dalam rancang bangun sumber ion siklotron untuk fasilitas PET.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih pertama saya sampaikan kepada Kementrian Riset dan Teknologi RI yang telah memberikan dana untuk penelitian ini melalui Program Riset Insentif PKPP tahun 2010. Kemudian saya ucapkan terima kasih kepada Sdr. Sunarto yang telah membantu dalam mengoperasikan perangkat eksperimen sumber ion. Dan juga ucapan terima kasih saya ucapkan kepada Sdr. Rian Suryo Darmawan ST yang telah membantu dalam pembuatan gambar teknik anoda sumber ion.

## DAFTAR PUSTAKA

1. ANONIM, "*Technical Specifications of Sumitomo HM-12S for PET Radio-Tracer Production System*", Sumitomo Heavy Industries, Ltd, 21 February (2008).
2. Y.S. KIM et al, "*New Design of The KIRAMS-13 Cyclotron for Regional Cyclotron Center*", *Proceedings of APAC 2004*, Gyeongju, Korea, (2004).
3. ANONIM, "*Fasilitas PET-CT dan Cyclotron RS Gading Pluit*", *Lembaran Informasi Instalasi Radiologi RS Gading Pluit* Jakarta, (2008).
4. V. PARKHOMCHUK and A. PAPASH, "*An 8 MeV  $H^-$  Cyclotron To Charge The Electron Cooling System For HESR*", *Budger Institute for Nuclear Physics*, Novosibirsk, Russia, E-9, (2006)
5. D.M. GOEBEL, R.E. WIRZ, and I. KATZ, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 23, No. 5, (2007) 5
6. D. MENZEL and R. GOMER, <http://www.jcp.aip.org/resource/1/jcpsa6/v41/i11>, *The Journal of Chemical Physics*, AIP online Publication Date: 2 July, (2004).
7. BOWLER, <http://www.helium.com/items/1484848-an-overview-about-the-chemical-element-copper> "An overview about the chemical element Copper", Created on: June 16, (2009).
8. B.C. LEE, et al, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 57, No. 6, December (2010) 1377.
9. T.Y.T. KUO, et al, "*On the Ion Source and the Internal Beam Currents of the CS-15 Compact Cyclotron*", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. NS-22, No.3, June (1975)